

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Pavlović

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Danijel Pavković, dipl. ing.

Student:

Matej Pavlović

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Danijelu Pavkoviću na stručnim savjetima i vodstvu kroz završni rad.

Matej Pavlović

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS OZNAKA	II
SAŽETAK.....	III
1. UVOD.....	1
2. OSNOVE RADA MOTORA	2
2.1. Matematički model motora.....	2
2.2. Upravljanje brzinom vrtnje promjenom napona armature.....	4
2.3. Statičko stanje motora.....	6
3. REGULACIJA BRZINE VRTNJE UZ SENZOR POZICIJE NISKE REZOLUCIJE	8
3.1. Uvod u teoriju Kalmanovog filtra.....	8
3.2. Estimirani proces.....	9
3.3. Algoritam.....	11
3.4. Usporedba različito rekonstruiranih signala brzine vrtnje s estimatom.....	13
3.5. Regulacija brzine vrtnje uz Kalmanov filter.....	19
4. ZAKLJUČAK.....	26
LITERATURA.....	27
PRILOZI.....	28

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Nadomjesna shema istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom.....	2
Slika 2.2 Blokovski dijagram modela motora.....	3
Slika 2.3 Simulacijski model motora	4
Slika 2.4 Rezultati simulacije na računalu	5
Slika 2.5 Mehaničke karakteristike motora pri promjeni napona napajanja	7
Slika 3.1 Simulacijski model Kalmanovog filtra	13
Slika 3.2 Simulacijski model motora s Kalmanovim filtrom.....	14
Slika 3.3 Signali napona na ulazu u pretvarač, napona armature i struje armature	15
Slika 3.4 Odzivi brzine vrtnje i pozicije uz čistu derivaciju signala pozicije	16
Slika 3.5 Uvećani detalj brzine vrtnje	16
Slika 3.6 Prijenosna funkcija niskopropusnog filtra	17
Slika 3.7 Odziv struje armature.....	18
Slika 3.8 Odziv pozicije i brzine vrtnje uz niskopropusni derivacijski filter pozicije	18
Slika 3.9 Uvećani detalj brzine vrtnje	19
Slika 3.10 Simulacijski model regulatora struje armature	19
Slika 3.11 Simulacijski model regulatora brzine vrtnje	20
Slika 3.12 Simulacijski model za regulaciju uz Kalmanov filter	21
Slika 3.13 Rezultati regulacije uz Kalmanov filter bez kvantizacije pozicije.....	22
Slika 3.14 Uvećani detalj brzine vrtnje	23
Slika 3.15 Rezultati regulacije uz Kalmanov filter uz kvantizaciju pozicije	24
Slika 3.16 Uvećani detalj brzine	25

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
u_a	V	Napon armature
i_a	A	Struja armature
R_a	Ω	Otpor armature
e	V	Elektromotorni napon
ω	rad/s	Brzina vrtnje
n	min^{-1}	Broj okretaja
L_a	H	Induktivnost armature
K_e	Vs/rad	Konstanta elektromotornog napona
m	Nm	Moment motora
K_m	Nm/A	Konstanta momenta motora
m_t	Nm	Moment tereta
J	kg m^2	Moment inercije motora
Φ_u	Wb	Uzbudni magnetski tok
T_a	s	Armatura vremenska konstanta
K_a	A/V	Pojačanje armaturnog kruga
T_{em}	s	Elektromehanička vremenska konstanta

SAŽETAK

U ovom radu objašnjena je regulacija brzine vrtnje istosmjernog motora s nezavisnom uzbudom primjenom senzora pozicije niske razlučivosti. Takav robusnan i razmjerno jeftin senzor smanjuje ukupnu cijenu pogona i olakšava rad u otežanim uvjetima. No za dobivanje kvalitetne regulacije, također je potrebno procjenjivati brzinu vrtnje u realnom vremenu. Kako bi se to postiglo, potrebno je poznavati matematički model motora. U tu svrhu iskoristit će se i postojeći mjerni signal struje te referenca napona motora.

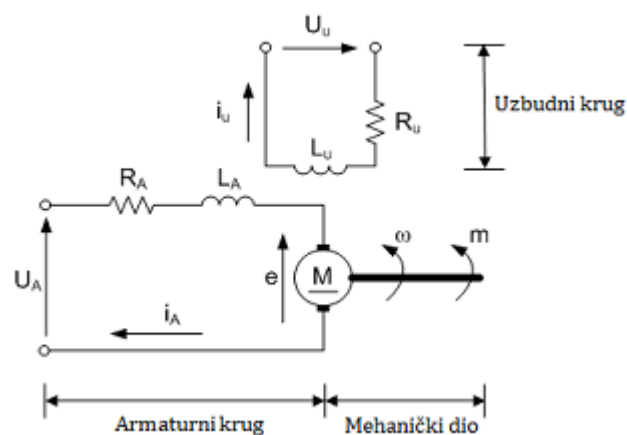
1. UVOD

Sve do danas, istosmjerni motor je pronašao jako široku primjenu u raznim elektromotornim pogonima. Premda ih polagano iz upotrebe istiskuju izmjenični motori, gotovo su nezamjenjivi u pogonima u kojima je potrebno regulirati brzinu vrtnje u jako širokom opsegu. Razvijaju se novi načini upravljanja kako bi se dobile dobre performace motora. Neka od zadnjih rješenja uključuju i neuronske mreže kao i neizrazito upravljanje (eng. Fuzzy logic). Ovdje će se ispitati regulacija brzine vrtnje s estimatom brzine preko Kalmanovog filtra u povratnoj vezi regulacijskog kruga. Nesavršenosti mjerenja senzora, uz činjenicu da podižu ukupnu cijenu pogona, stvaraju određene poteškoće za konkurentnost istosmjernog motora u odnosu na izmjenični. Stoga je logičan korak u razvoju usmjeravanje na bezsenzorsko upravljanje o čemu će nešto više biti rečeno u sljedećim poglavljima ovog rada.

2. OSNOVE RADA MOTORA

2.1. Matematički model motora

Istosmjerni elektromotor je rotacijski električni stroj koji daje mehanički rad napajanjem električnom energijom iz istosmjernog izvora. U izvedbi s nezavisnom uzбудom izvori uzbudnog i armaturnog napona su odvojeni. Na slici 2.1 je prikazana nadomjesna elektromehanička shema motora.



Slika 2.1 Nadomjesna shema istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom

Armaturni krug sa prethodne slike je električni dio motora i opisuje se Kirchoffovim zakonom o ravnoteži napona prema jednađbi

$$u_a(t) = i_a(t)R_a + e(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}. \quad 2.1$$

Elektromotorni napon je izražen u jednađbi

$$e(t) = k_e \phi_u \omega(t) = K_e \omega(t). \quad 2.2$$

Newtonova jednađba ravnoteže momenata će poslužiti za opisivanje mehaničkog dijela.

$$m(t) = m_t(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad 2.3$$

Moment kojeg motor razvija dobiva se preko jednađbe

$$m(t) = k_m \phi_u i(t) = K_m i(t). \quad 2.4$$

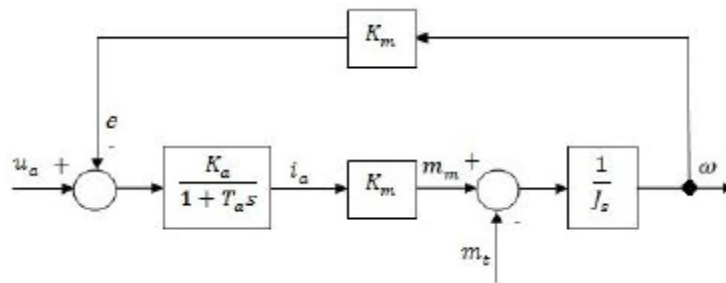
Treba napomenuti kako se pretpostavlja konstantni uzbudni magnetski tok.

Iz prethodne četiri jednačbe Laplaceovim transformacijama dobivaju se jednačbe za struju armature 2.5, elektromotorni napon 2.6 te moment motora 2.7 na kojima se temelji izrada blokovskog dijagrama simulacijskog modela motora.

$$\frac{i_a(s)}{u(s) - e(s)} = \frac{1}{R_a + L_a s} = \frac{K_a}{1 + T_a s} \quad 2.5$$

$$e(s) = K_e \omega(s) \quad 2.6$$

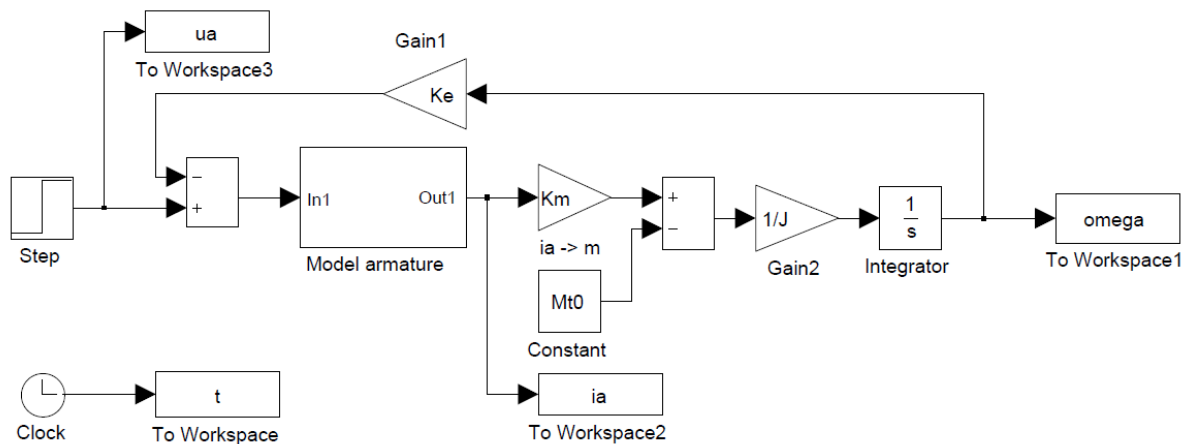
$$m(s) = m_t(s) + J\omega(s)s = K_m i(s) \quad 2.7$$



Slika 2.2 Blokovski dijagram modela motora

2.2. Upravljanje brzinom vrtnje promjenom napona armature

Nakon izrade blokovskog dijagrama simulacijskog modela u programskom paketu Matlab/Simulink, može se ispitati odziv brzine vrtnje na skokovitu pobudu armaturnog napona.

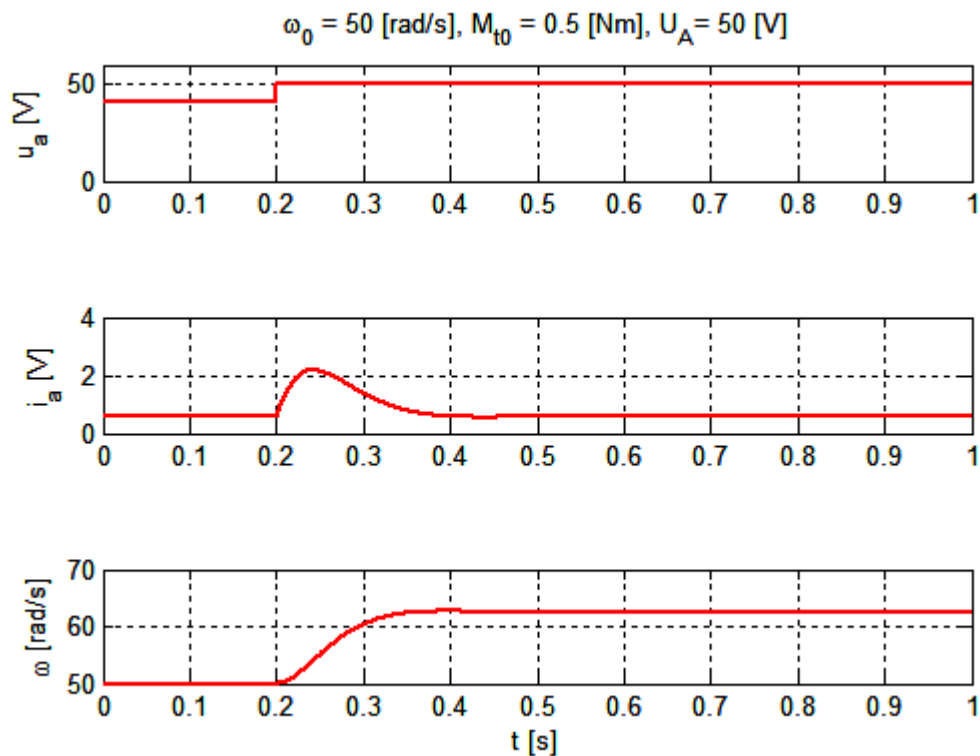


Slika 2.3 Simulacijski model motora

Prema jednadžbi 2.8 izvedenoj iz jednadžbi 2.5, 2.6 i 2.7 i uz uvjet da je opterećenje motora konstantno, za očekivati je dobivanje odziva kao kod P_2 člana.

$$\omega(s) = u_a(s) \frac{1}{K_e} \frac{1}{T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1} - m_t(s) \frac{1}{K_a K_e K_m} \frac{T_a s + 1}{T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1} \quad 2.8$$

U prethodnoj jednadžbi elektromehanička vremenska konstanta T_{em} dobivena je supstitucijom izraza $T_{em} = J/(K_a K_m K_e)$.



Slika 2.4 Rezultati simulacije na računalu

Na početku simulacije postoji određeno početno opterećenje te se motor vrti određenom početnom brzinom. Za to je potreban određeni napon armature koji ostaje konstantan do skokovite promjene. U tom trenutku struja naglo skače no vraća se na iznos prije promjene napona jer nije došlo do povećanja opterećenja. Brzina raste i nakon manjeg prebačaja postiže stacionarnu vrijednost koja odgovara željenom naponu armature.

2.3. Statičko stanje motora

U slučaju zanemarivanja prijelaznih pojava motora dobivaju se stacionarne jednačbe u kojima dakle veličine ne ovise o parametru vremena. One se izvode iz jednačbi 2.1, 2.2, 2.3 te 2.4 jednostavno uz zanemarivanje članova s vremenskom derivacijom.

$$U_a = E + I_a R_a \quad 2.9$$

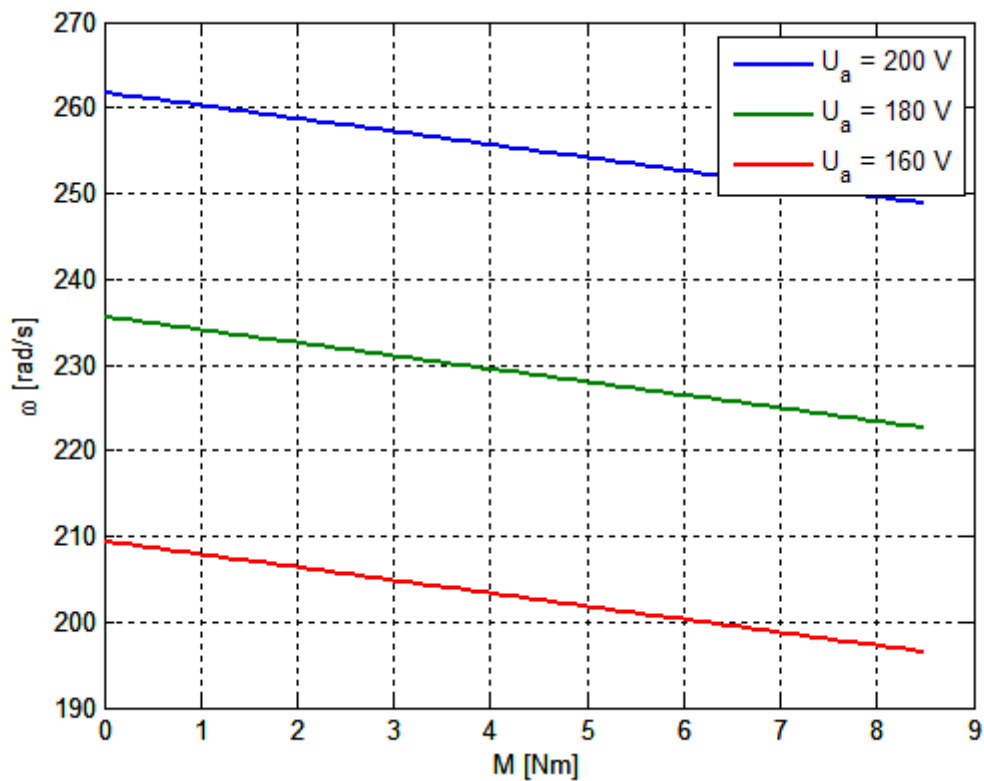
$$E = K_e \omega \quad 2.10$$

$$M = M_t = K_m I_a \quad 2.11$$

Iz ovih jednačbi lako je izvesti izraz pomoću kojeg se dobiva funkcija brzine vrtnje u stacionarnom stanju.

$$\omega = \frac{U_a - I_a R_a}{K_e} = \underbrace{\frac{1}{K_e} U_a}_{\omega_0} - \underbrace{\frac{1}{K_e K_m} M_t}_{\Delta\omega} \quad 2.12$$

Ta funkcija je linearna i sastoji se od početne brzine ω_0 koja ovisi o naponu armature, te dijela $\Delta\omega$ koji se mijenja u odnosu na opterećenje. Početna brzina za određeni napon je zapravo brzina praznog hoda, kad je motor u neopterećenom stanju. Za razne iznose napona armature dobiva se skup paralelnih pravaca kao na slici 2.5.



Slika 2.5 Mehaničke karakteristike motora pri promjeni napona napajanja

Iz prethodne slike je vidljivo kako brzina vrtnje pada s povećanjem opterećenja na određenom iznosu napona armature, dok se pri smanjivanju napona armature smanjuje brzina vrtnje praznog hoda pojedine karakteristike što se moglo i pretpostaviti prema prethodnoj jednadžbi. Upravljanje brzinom vrtnje promjenom napona izvodi se obično samo do nazivnog napona. U trajnom pogonu ne smije se prekoračiti nazivno opterećenje.

3. REGULACIJA BRZINE VRTNJE UZ SENZOR POZICIJE NISKE REZOLUCIJE

3.1. Uvod u teoriju Kalmanovog filtra

Kako bi se postigla kvalitetna regulacija brzine vrtnje motora, najprije treba promotriti s čime se zapravo raspolaže. Postoji mnogo materijala, vezanog uz analizu sustava i određivanje matematičkih modela sustava kao i teorije upravljanja, koji su dostupni studentima na prediplomskom studiju. No problem je u tome što ti modeli i teorije, premda često zadovoljavaju određene kriterije, nisu savršeni. Potpunu točnost nije niti moguće postići iz više razloga. Najprije zato što sami iznosi parametra modela nikad ne mogu biti u potpunosti poznati. Čak i bi to bilo moguće, postoje mnogo faktora koji utječu na njih i vremenom će sigurno doći do određenih odstupanja, bilo zbog starenja, bilo zbog zagrijavanja, naprimjer. Mjerenja koja koristimo za upravljanje su jedine povratne informacije koje imamao o procesu. Kao i sam model sustava, mjerenja također nisu savršena i podložna su različitim smetnjama. Nekad mjeriti određene veličine niti ne dolazi u obzir zbog različitih fizičkih ograničenja ili iz financijskih razloga. Uzimajući sve navedeno u obzir, Kalmanov filter se čini kao razumno rješenje.

Kalmanov filter u stvari nije filter u klasičnom smislu riječi. Zapravo se radi se o rekurzivnom algoritmu koji na optimalan način za slučajni proces opisan modelom u prostoru stanja, na osnovu zašumljenih mjerenja generira estimacije tako da odstupanje od stvarnih vrijednosti bude što je manje moguće. No kako se iz zašumljenih signala pomoću Kalmanovog filtra dobivaju čišći signali, može se smatrati filtrom. Prednost ovog algoritma je ta da za linearne sustave sa normalnom raspodjelom vjerojatnosti greške daje najbolje estimacije uz to što su mu potrebna samo prošla stanja čime se smanjuju zahtjevi za memorijom.

3.2. Estimirani proces

Kalmanov filtar se rabi za estimaciju vektora varijabli stanja $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$ diskretno upravljano procesa kojeg opisuje linearna stohastička jednažba diferencija:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k). \quad 3.1$$

Linearna stohastička jednažba dobivanja mjernih rezultata je:

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k), \quad 3.2$$

gdje vektor $\mathbf{z} \in \mathcal{R}^n$ predstavlja dobiveno mjerenje. Slučajne varijable $\mathbf{w}(k)$ i $\mathbf{v}(k)$ predstavljaju šumove modela sustava i mjerenja. Pretpostavlja se da su ta dva šuma bijeli šumovi, međusobno nepovezani čija je funkcija gustoće vjerojatnosti normalne razdiobe $p(\mathbf{w}(k)) \sim N(0, \mathbf{Q}(k))$ i $p(\mathbf{v}(k)) \sim N(0, \mathbf{R}(k))$. U praksi je moguće da se kovarijantne matrice $\mathbf{Q}(k)$ i $\mathbf{R}(k)$ mijenjaju u svakom vremenskom trenutku, ali će se pretpostaviti da su konstantne pa će ih se dalje označavati kao \mathbf{Q} , odnosno \mathbf{R} . Matrica $\mathbf{F}(k)$ povezuje stanje u trenutku $k-1$ sa stanjem u trenutku k u slučaju nepostojanja kontrolnog signala ili procesnog šuma. Matrica $\mathbf{G}(k)$ povezuje opcionalni kontrolni signal sa stanjem. Matrica $\mathbf{H}(k)$ veličine $m \times n$ povezuje stanje sa mjernim rezultatom. U daljnjem tekstu će se pretpostaviti da su matrice $\mathbf{A}(k)$, $\mathbf{B}(k)$ i $\mathbf{H}(k)$ konstantne.

Za dobivanje svih potrebnih matrica u diskretnom obliku, najprije treba doći do kontinuiranog modela sustava u prostoru stanja. U općenitom slučaju taj zapis izgleda ovako:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}, \end{aligned} \quad 3.2$$

gdje su:

\mathbf{x} - vektor varijabli stanja,

\mathbf{u} – vektor ulaznih varijabli,

\mathbf{y} – vektor izlaznih varijabli,

\mathbf{A} – matrica stanja ili sustava,

\mathbf{B} – ulazna matrica,

\mathbf{C} – izlazna matrica,

D – matrica direktnog preslikavanja ulaza na izlaz.

U slučaju istosmjernog elektromotora s nezavisnom uzбудom kod kojeg se mjeri pozicija (kut zakreta vratila) i jakost struje armature, a želi se regulirati brzina vrtnje vektor varijabli stanja će sadržavati veličinu kuta zakreta α , brzinu vrtnje ω te struju i_a .

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix} \quad 3.3$$

Vektor ulaza ima veličinu napona armature

$$\mathbf{u} = [u_a], \quad 3.4$$

dok vektor izlaznih varijabli sadržava mjerene veličine

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix}. \quad 3.5$$

Iz jednadžbi 2.1 – 2.4 imajući u vidu prethodno složene vektore, matrica stanja izgleda ovako

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_e/L_a & -1/T_a \end{bmatrix}, \quad 3.6$$

matrica ulaza

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix}, \quad 3.7$$

te izlazna matrica

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad 3.8$$

Matrica D postaje nul-matrica jer se varijable stanja ne preslikavaju izravno na izlaz.

Sljedeći korak prebacivanja iz kontinuiranog u diskretni sustav napraviti će se u Matlabu funkcijom *c2dm* čime se dobivju sljedeće vrijednosti matrica F i G :

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0010 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.0075 & 0.9608 \end{bmatrix}, \quad 3.9$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0098 \end{bmatrix}. \quad 3.10$$

3.3. Algoritam

Kalmanov filter estimira varijable stanja procesa koristeći oblik povratne veze - povratna veza daje pogrešku procjene vrijednosti mjerenja, dobivenu na temelju estimiranih varijabli stanja procesa i poznate izlazne jednadžbe. Jednadžbe Kalmanovog filtra dijele se u dvije grupe: jednadžbe koje služe za ažuriranje stanja i jednadžbe koje služe za ažuriranje mjerenja.

Jednadžbe ažuriranja stanja projiciraju trenutno stanje i estimaciju kovarijance greške kako bi se dobile a priori (iz modela) estimacije za sljedeći vremenski korak. Jednadžbe ažuriranja mjerenja služe za dobivanje povratne informacije, odnosno za uklapanje novog mjerenja u a priori estimaciju kako bi se dobila poboljšana a posteriori (stečena promatranjem) estimacija stanja.

Jednadžbe ažuriranja stanja također se mogu promatrati kao jednadžbe predikcije, dok se jednadžbe mjerenja mogu gledati kao jednadžbe korekcije.

Jednadžbe ažuriranja stanja diskretnog Kalmanovog filtra su:

$$\hat{\mathbf{x}}(k)^- = \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{G} \mathbf{u}(k-1) \quad 3.11$$

$$\mathbf{P}(k)^- = \mathbf{F} \mathbf{P}(k-1) \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad 3.12$$

Jednadžbe ažuriranja mjerenja su:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k)^- \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}(k)^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad 3.13$$

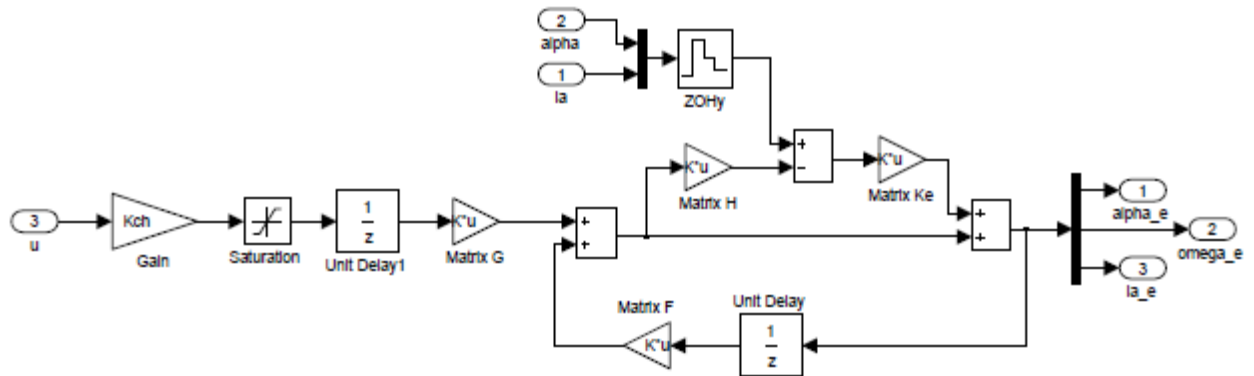
$$\hat{\mathbf{x}}(k)^+ = \hat{\mathbf{x}}(k)^- + \mathbf{K}(k) [\mathbf{z}(k) - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}(k)^-] \quad 3.14$$

$$\mathbf{P}(k)^+ = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}] \mathbf{P}(k)^- \quad 3.15$$

Prvo se izračunava optimalna vrijednost matrice \mathbf{K} prema gornjoj jednadžbi. Zatim se provodi mjerenje trenutnog stanja procesa i dobiva se $\mathbf{z}(k)$. Uvođenjem dobivenog mjerenja u drugu jednadžbu dolazimo do aposteriornog stanja. Zadnja jednadžba je izračun kovarijance greške estimacije aposteriornog stanja. Može se vidjeti da će konačna kovarijanca greške biti manja od apriorne kovarijance jer smo uveli mjerenje koje uglavnom povećava sigurnost procjene. Nakon jedne iteracije gore navedenih jednadžbi, proces se ponavlja tako da je ulaz u sljedeću iteraciju $k+1$ zadnje izračunato aposteriorno stanje i aposteriorna kovarijanca greške $\hat{\mathbf{x}}(k)^+$, odnosno $\mathbf{P}(k)^+$. Rekurzija (novo stanje ovisi samo o prethodnom stanju) čini Kalmanov filter pogodnim za jednostavnu implementaciju jer uvjetuje trenutnu procjenu stanja svim dotadašnjim mjerenjima. Nakon što su definirani svi potrebni podaci za projektiranje Kalmanovog filtra u prethodnom odjeljku ovog rada, u Simulinku je izrađena blokovska shema motora s filtrom.

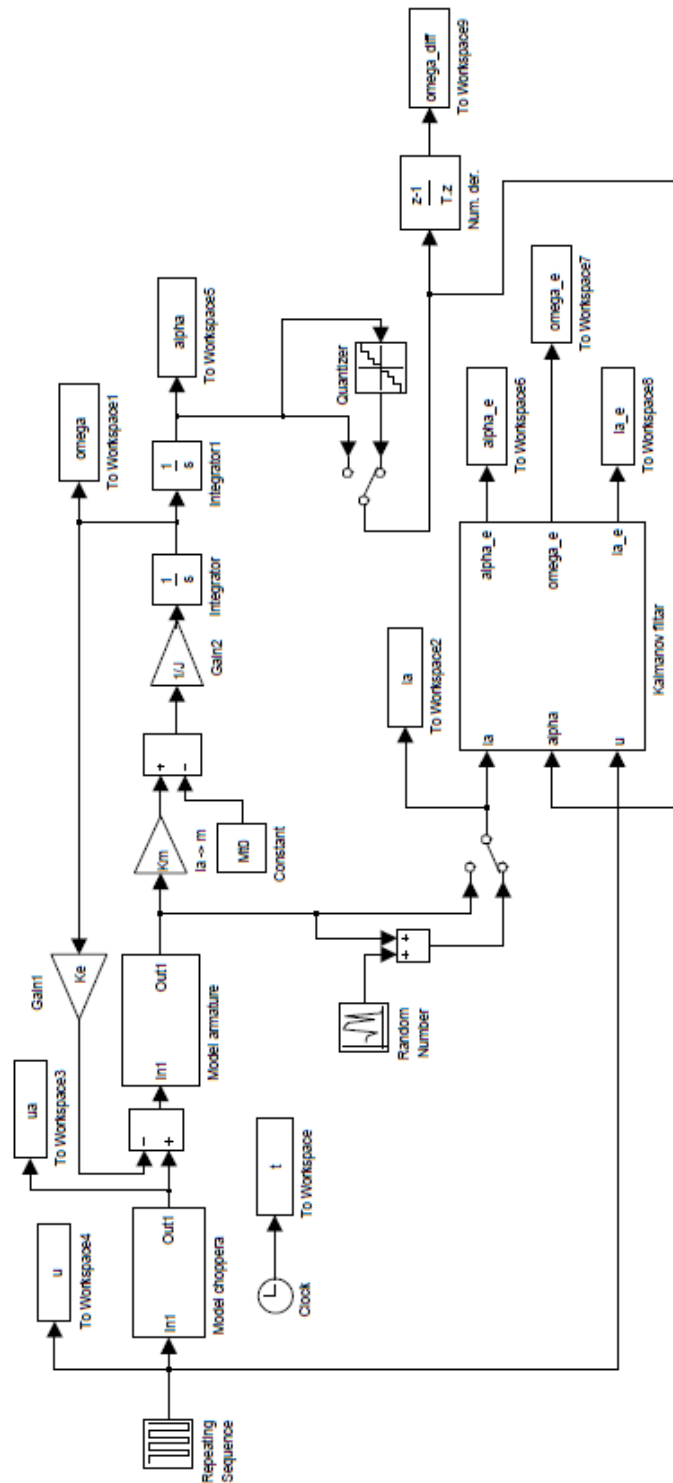
3.4. Usporedbe različito rekonstruiranih signala brzine vrtnje s estimatom

Nakon što su definirani svi potrebni podaci za projektiranje Kalmanovog filtra u prethodnom odjeljku ovog rada, u Simulinku je izrađena blokovska shema motora s filtrom.

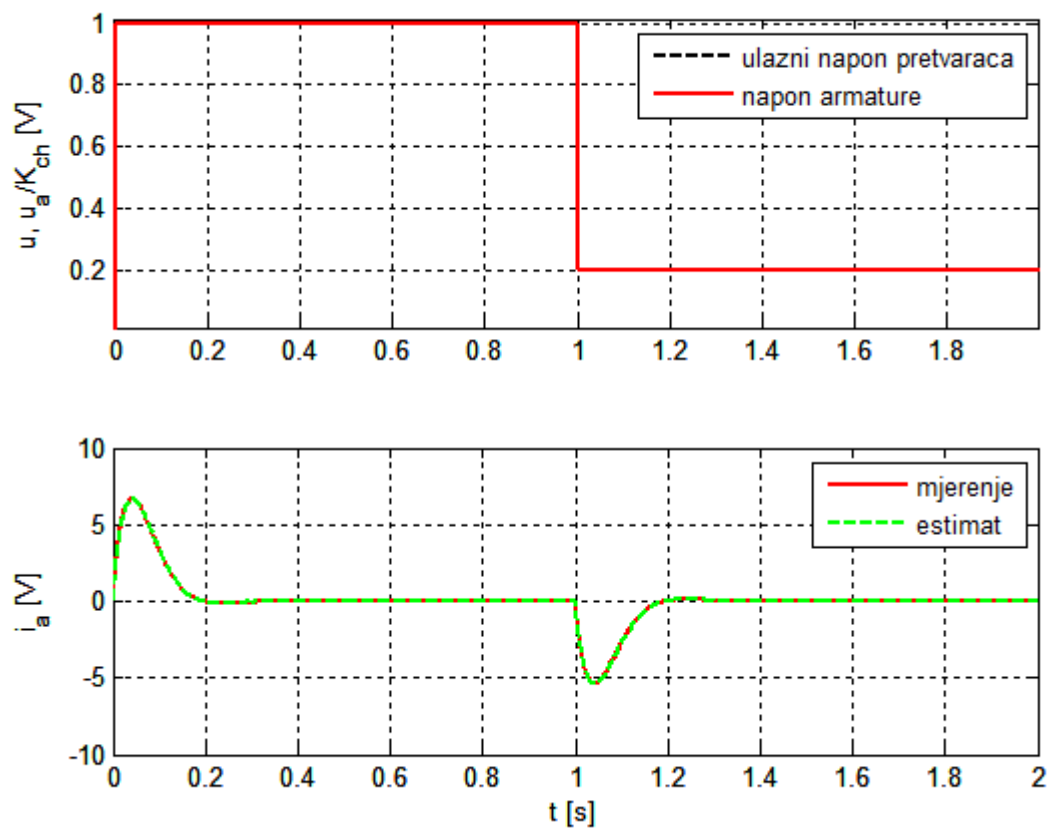


Slika 3.1 Simulacijski model Kalmanovog filtra

Na slici 3.1 prikazana je prikana je blokovska shema Kalmanovog filtra koja je napravljena u Simulinku. Tu se računaju jednačbe predikcije novih stanja na osnovu modela sustava, dok se korekcija mjerenjem računa u m-skripti kako bi se uštedjelo na vremenu.

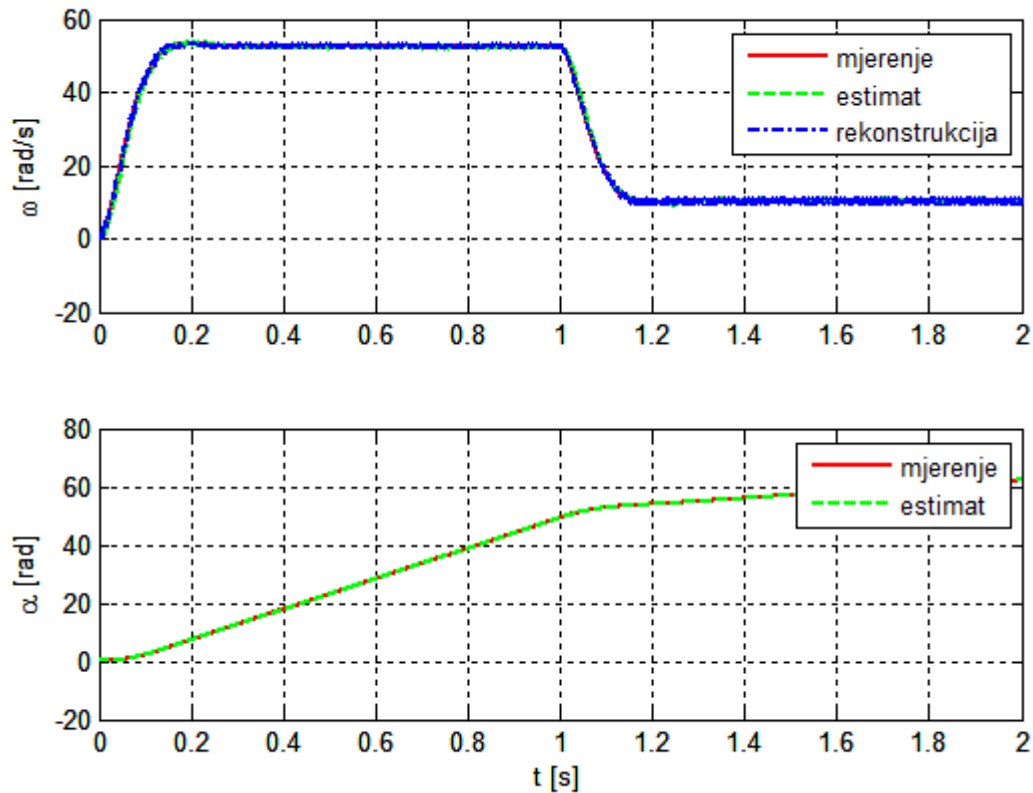


Slika 3.2 Simulacijski model motora s Kalmanovim filtrom

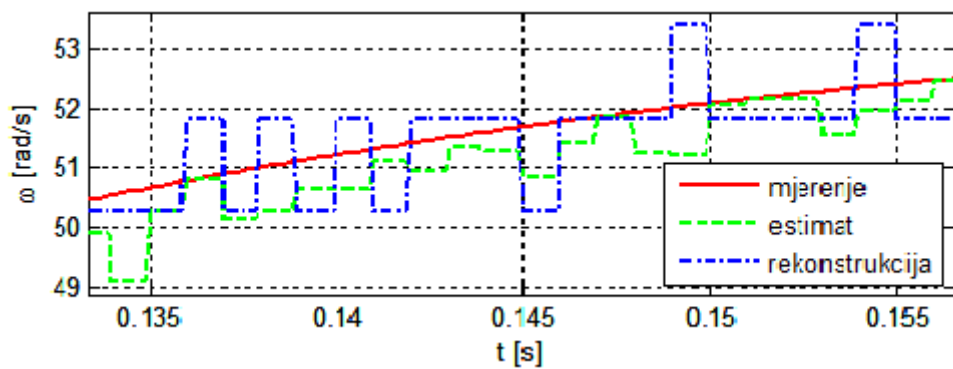


Slika 3.3 Signali napona na ulazu u pretvarač, napona armature i struje armature

Ovakav napon na ulazu frekvencijskog pretvarača će se koristiti za ispitivanje svih slučajeva.



Slika 3.4 Odzivi brzine vrtnje i pozicije uz čistu derivaciju signala pozicije



Slika 3.5 Uvećani detalj brzine vrtnje

Iz prethodne slike se može vidjeti kako se estimat puno mرنije ponaša od rekonstruiranog signala zbog toga što derivacijsko djelovanje uzrokuje veću razinu šuma.

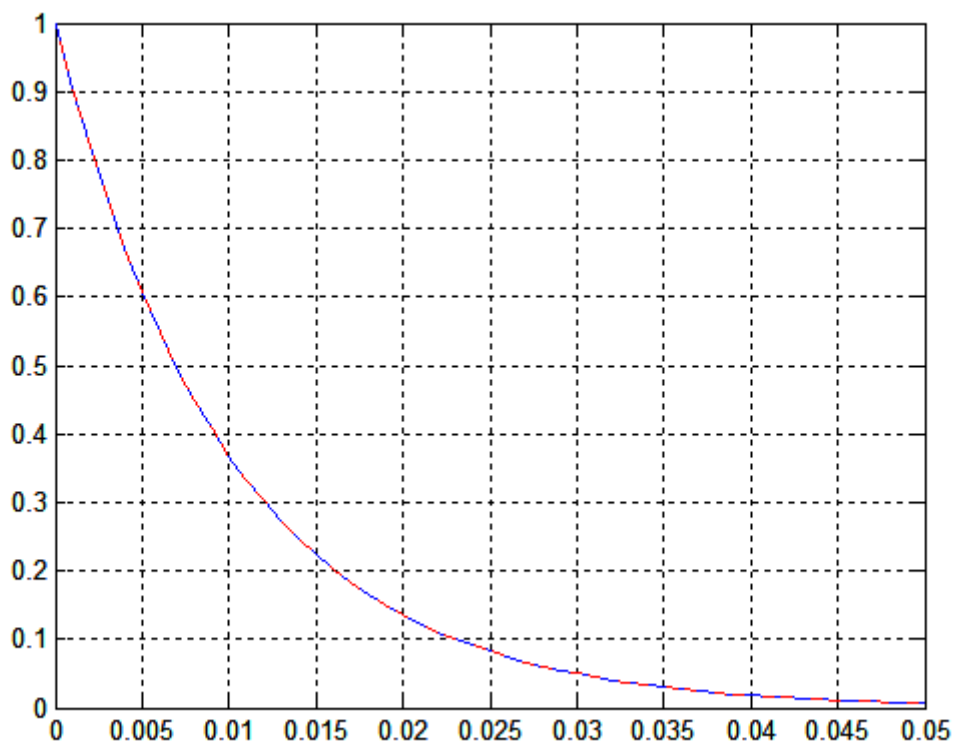
Ispitat će se i slučaj s derivacijskim niskopropusnim filtrom prvog reda signala pozicije čime će se smanjiti utjecaj šuma u signalu brzine vrtnje u odnosu na slučaj bez tog filtra. Filtar u frekvencijskoj domeni ima sljedeću prijenosnu funkciju

$$G_f(s) = \frac{\omega(s)}{\alpha(s)} = \frac{s}{T_f s + 1}$$

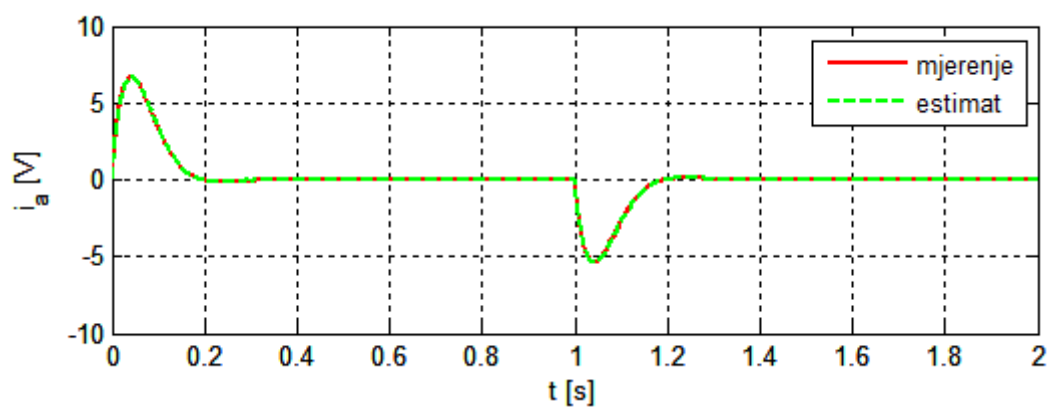
koja u z-domeni izgleda ovako

$$G_f(z) = \frac{\omega(z)}{\alpha(z)} = \frac{z - 1}{z - a}$$

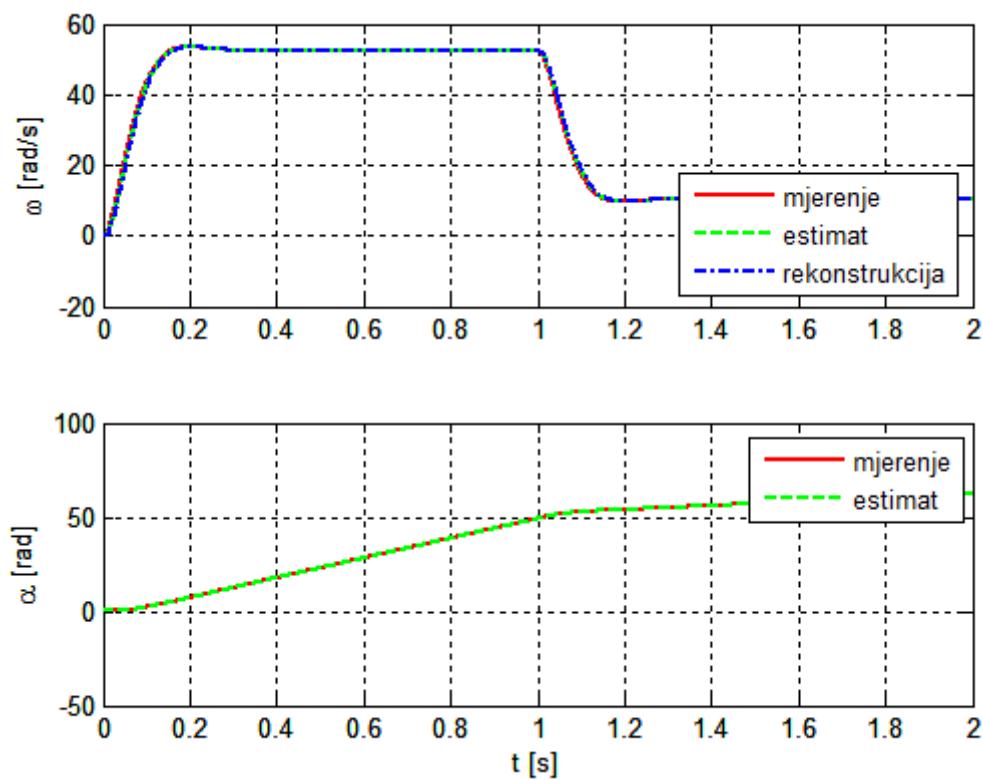
pri čemu je parametar $a = e^{\frac{-T}{T_f}}$. Vrijeme T odnosi se na vrijeme uzorkovanja za rekonstrukciju brzine vrtnje, dok je T_f vremenska konstanta filtra. Na prethodnoj slici prikazana je prijenosna funkcija filtra.



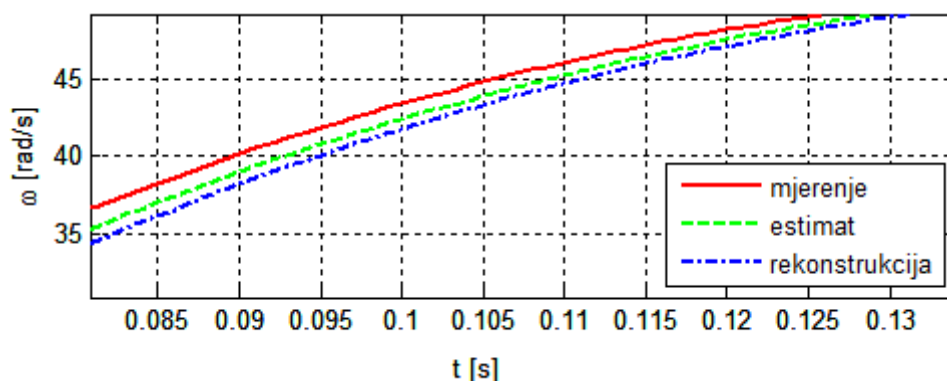
Slika 3.6 Prijenosna funkcija niskopropusnog filtra



Slika 3.7 Odziv struje armature



Slika 3.8 Odziv pozicije i brzine vrtnje uz niskopropusni derivacijski filter pozicije

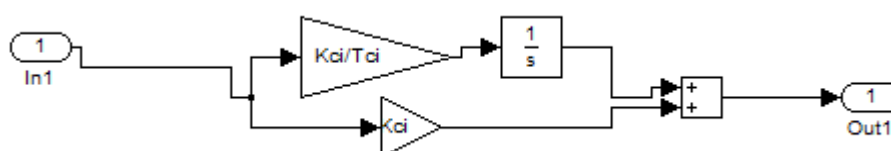


Slika 3.9 Uvećani detalj brzine vrtnje

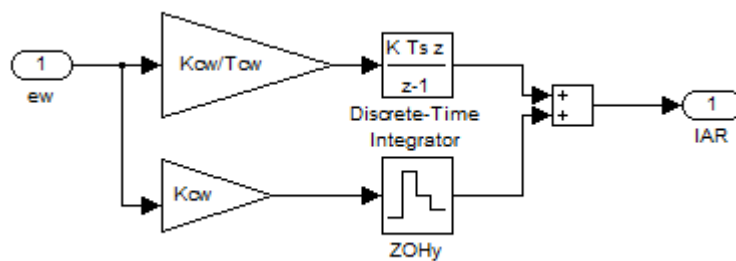
Ako se usporedi prethodna slika sa slikom 3.5 može se zaključiti kako signali na slici 3.8 puno manje osciliraju zbog toga što su harmonici viših frekvencija dobro potisnuti niskopropusnim filtrom no cijena te prednosti je veće kašnjenje signala.

3.5. Regulacija brzine vrtnje uz Kalmanov filter

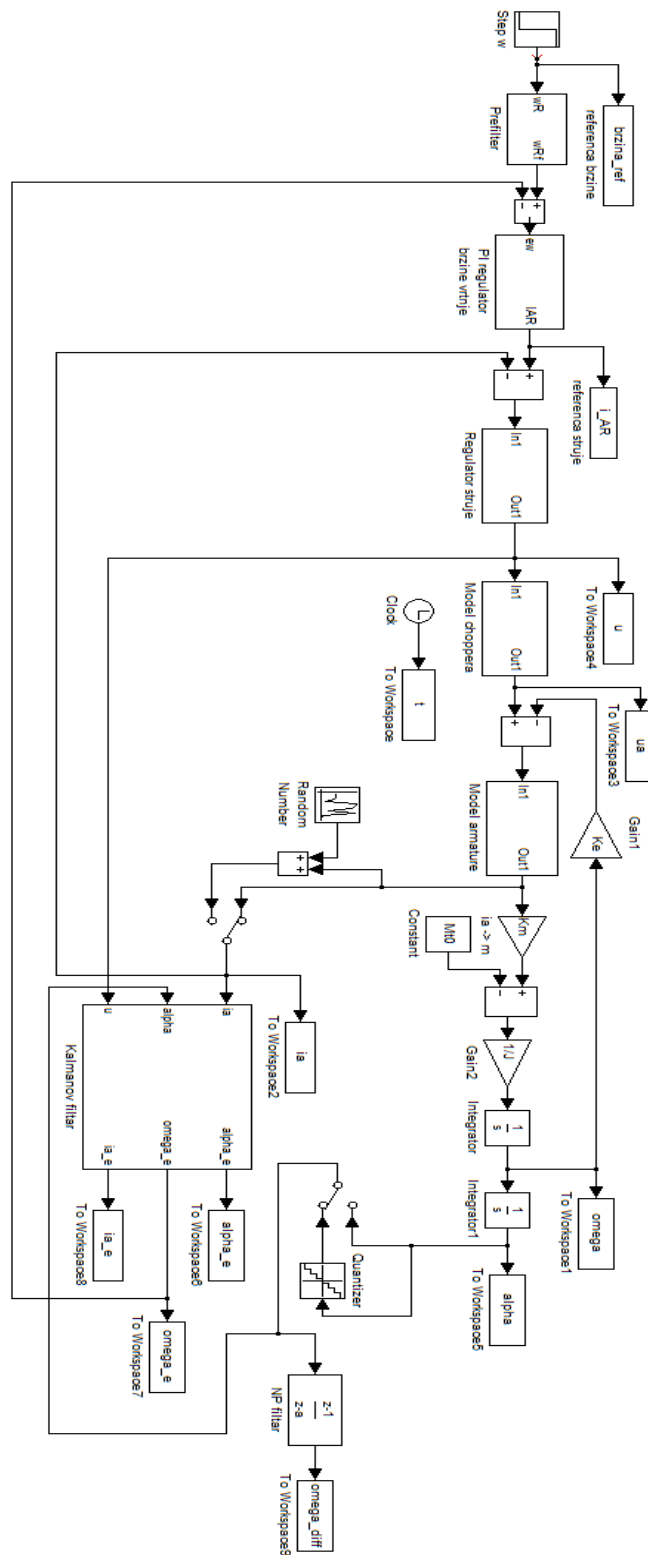
Što se tiče same regulacije brzine vrtnje radi se o sustavu kaskadne regulacije pri čemu izlaz regulatora brzine vrtnje predstavlja referentnu veličinu podređenom regulacijskom krugu struje armature. Oba regulatora su PI regulatori i podešeni su po optimumumu dvostrukog odnosa pri čemu će se karakteristični odnosi D_i postaviti na iznos 0.5 čime se postiže tzv. kvazi-aperiodski odziv. Iznosi parametara regulatora se nalaze u prilogu 5, a simulacijski modeli na slici 3.9 i 3.10



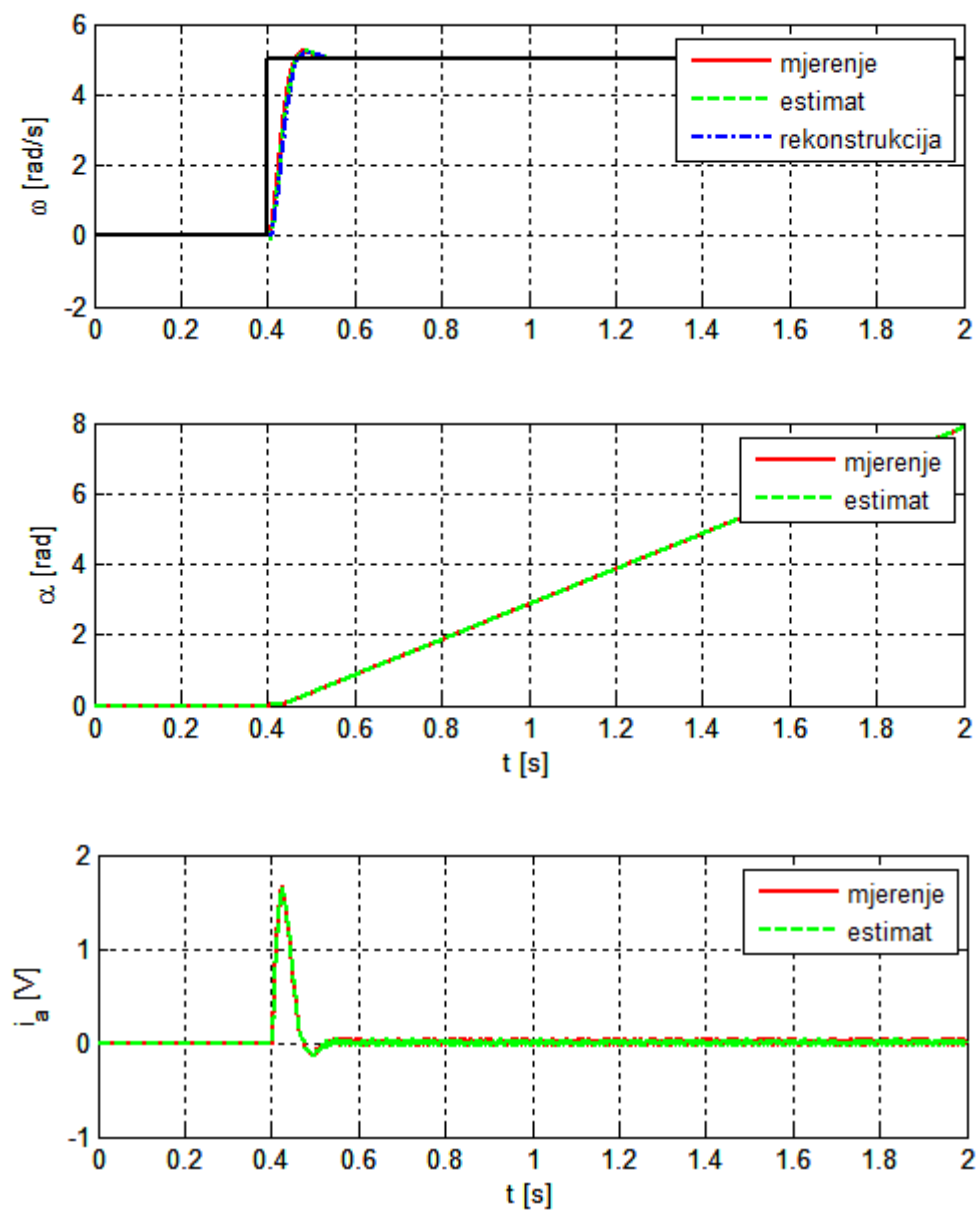
Slika 3.10 Simulacijski model regulatora struje armature



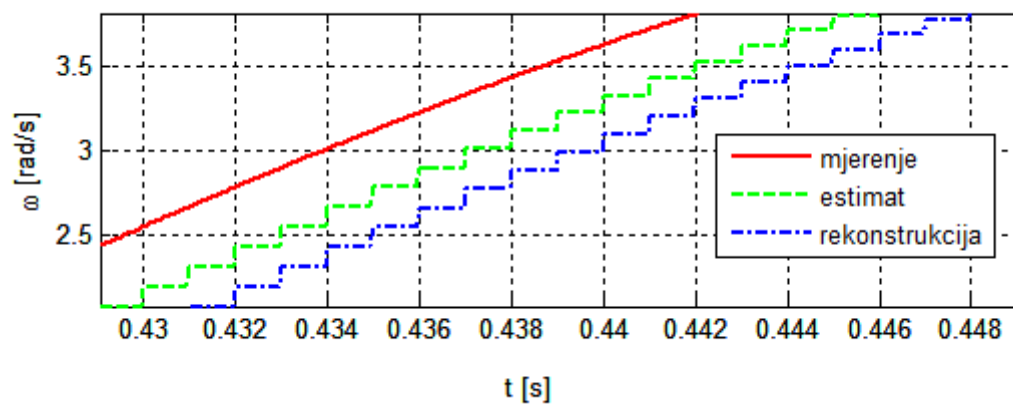
Slika 3.11 Simulacijski model regulatora brzine vrtnje



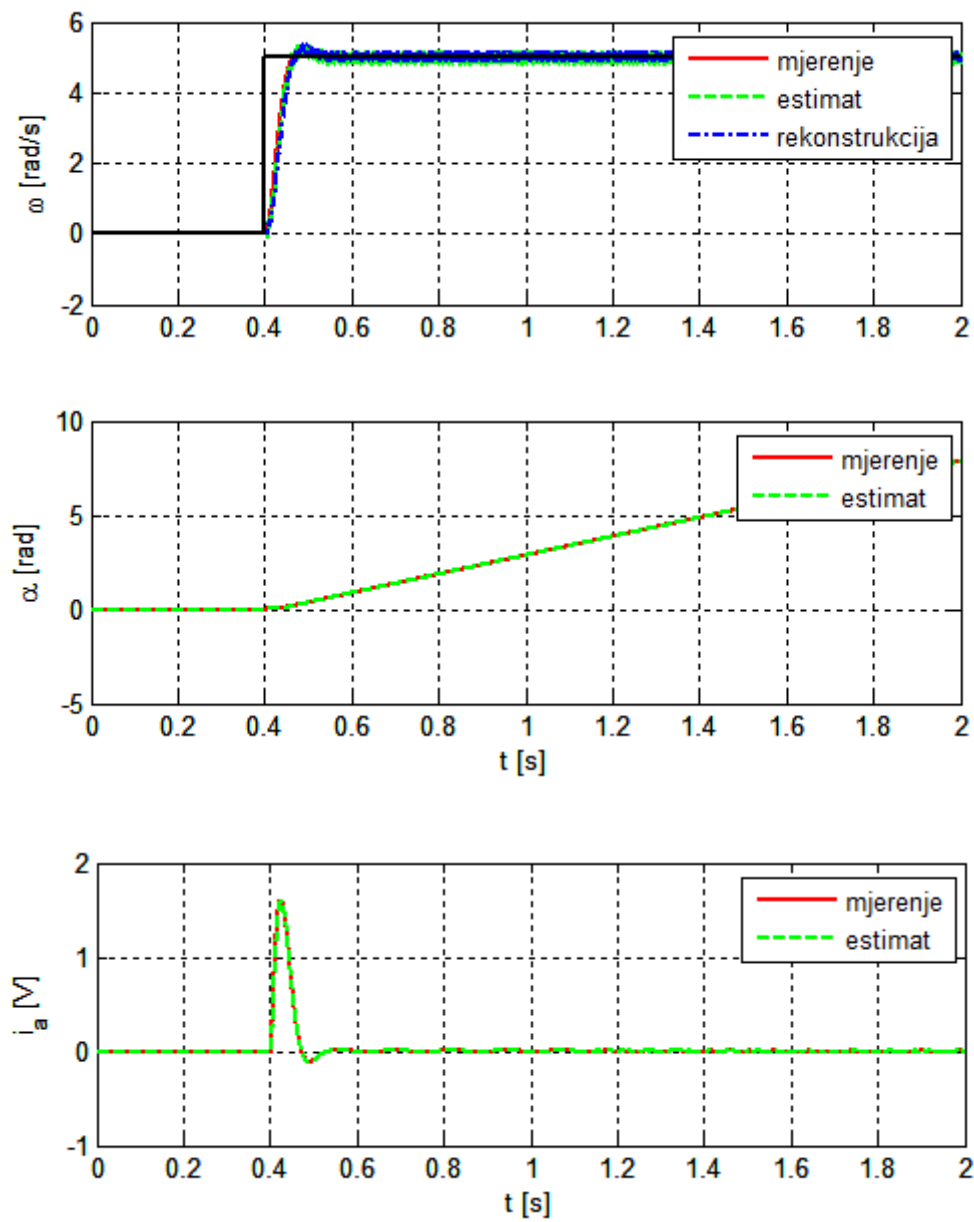
Slika 3.12 Simulacijski model za regulaciju uz Kalmanov filtar



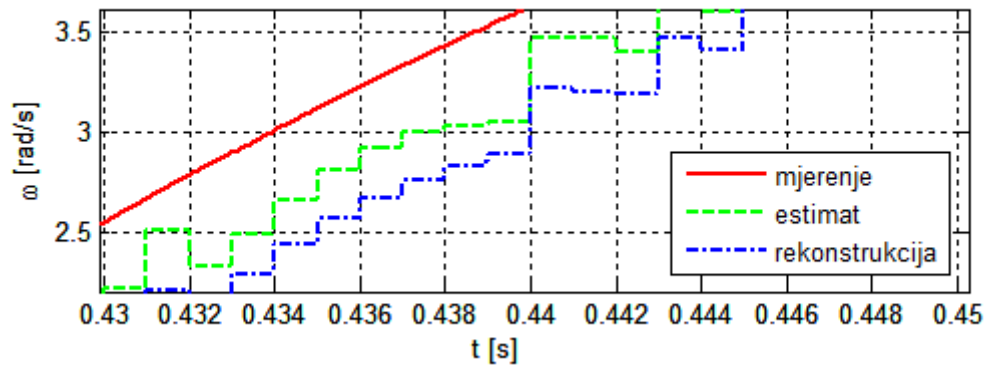
Slika 3.13 Rezultati regulacije uz Kalmanov filter bez kvantizacije pozicije



Slika 3.14 Uvećani detalj brzine vrtnje



Slika 3.15 Rezultati regulacije uz Kalmanov filter uz kvantizaciju pozicije



Slika 3.16 Uvećani detalj brzine

Kako se može vidjeti sa slika 3.13 i 3.11 postiže se zadovoljavajuća kvaliteta regulacije primjenom Kalmanovog filtra kao estimatora brzine vrtnje. Naravno, u slučaju kada nema izražene kvantizacije signala pozicije, regulacija je kvalitetnija u smislu manjih perturbacija u mjernim signalima. Na slici 3.13 veće su oscilacije signala kao i kašnjenje.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je iznesena usporedba odziva brzine vrtnje dobivene izravnom derivacijom signala pozicije te estimatom dobivenim preko Kalmanovog filtra. Također je uspoređivana kvaliteta signala iz niskopropusnog derivacijskog filtra pozicije s tim estimatom.

U regulaciji brzine vrtnje korišten umjesto klasičnog povratnog mjenog signala korišten je estimat brzine koji je dobiven pomoću signala struje armature i pozicije (kuta zakreta motora). Radi se o sustavu kaskadne regulacije pri čemu izlaz regulatora brzine vrtnje predstavlja referentnu veličinu podređenom regulacijskom krugu struje armature. Oba regulatora su PI regulatori i podešeni su po optimumumu dvostrukog odnosa pri čemu su karakteristični odnosi D_i postavljeni na iznos 0.5 čime se postiže tzv. kvazi-aperiodski odziv.

Provjera ovakvog koncepta regulacije nažlost nije proveda na laboratorijskom postavu što bi se moglo napraviti u nekom daljnjem radu na ovom konceptu regulacije.

LITERATURA

1. B. Skalicki, J. Grilec: „Električni strojevi i pogoni“, FSB press, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
2. D. Pavković: Procjena varijabli stanja automobilskog pogona s primjenama u regulaciji, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
3. G. Welsch, G Bishop: An Introduction to the Kalman Filter, University of North Carolina, 2001.
4. D. Pavković, J.Deur: nastavni materijali iz kolegija „Elektromotorni servopogoni“, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2008.

PRILOZI

1. Inicijalizacijska skripta za simulaciju odziva brzine vrtnje na skokovitu promjenu armaturnog napona

```
clc
clear all

% Parametri motora (natpisna plocica)
Un = 200; % [V]
In = 10; % [A]
nn = 2000; % [rpm]
Pn = 1800; % [W]
% Izvedeni parametri motora
Ka = 0.25; % [A/V]
Ta = 25.0e-3; % [s]
Ra = 1/Ka; % [Ohm]
La = Ra*Ta; % [H]
Ke = (Un - In*Ra)/(nn*pi/30); % [Vs/rad]
Km = Pn/In/(nn*pi/30); % [Nm/A]
J = 0.01; % [kg/m^2]

fprintf(1, '\n\t Unesi krajnji iznos napona armature [V]:\n\n');
fprintf(1, '\t\t'); UA = input(' UA = '); fprintf(1, '\n');
if isempty(UA)
    UA = 0.0;
end

fprintf(1, '\n\t Unesi pocetni iznos brzine vrtnje [rad/s]:\n\n');
fprintf(1, '\t\t'); w0 = input(' n = '); fprintf(1, '\n');
if isempty(w0)
    w0 = 0.0;
end

fprintf(1, '\n\t Unesi pocetni iznos momenta tereta [Nm]:\n\n');
fprintf(1, '\t\t'); Mt0 = input(' Mt0 = '); fprintf(1, '\n');
if isempty(Mt0)
    Mt0 = 0.0;
end

% Pocetni iznos napona armature:
UA0 = Ke*w0 + Mt0/Km/Ka;

% Pocetni iznos struje armature
IA0 = Mt0/Km; % [A]

% Pokreni simulaciju
sim('motor_1');

fprintf(1, '\n\t Signali:');
fprintf(1, '\n\t ----- \n');
fprintf(1, '\n\t ia -> struja armature [A]');
fprintf(1, '\n\t ua -> napon armature [V]');
fprintf(1, '\n\t omega -> brzina vrtnje motora [rad/s]');
fprintf(1, '\n\t t -> vrijeme');
```

```

fprintf(1, '\n\n');

set(gcf, 'Color', 'w')

figure(1),
subplot(311), plot(t, ua, 'r', 'LineWidth', 2), ylim([0 UA+10]), grid on
title(['\omega_0 = ' num2str(w0) ' [rad/s], ' 'M_t_0 = ' num2str(Mt0) ' [Nm], '
'U_A= ' num2str(UA) ' [V]'])
ylabel('u_a [V]')
subplot(312), plot(t, ia, 'r', 'LineWidth', 2), grid on
ylabel('i_a [V]')
subplot(313), plot(t, omega, 'r', 'LineWidth', 2), grid on
ylabel('\omega [rad/s]'), xlabel('t [s]')

```

2. Inicijalizacijska skripta za stacionarne karakteristike brzine vrtnje

```

clc
clear all

% Parametri motora (natpisna plocica)
Un = 200; % [V]
In = 10; % [A]
nn = 2000; % [rpm]
Pn = 1800; % [W]
J = 0.01; % [kgm^2]
% Izvedeni parametri motora
Ka = 0.25; % [A/V]
Ta = 25.0e-3; % [s]
Ra = 1/Ka; % [Ohm]
La = Ra*Ta; % [H]
Ke = (Un - In*Ra)/(nn*pi/30); % [Vs/rad]
Km = Pn/In/(nn*pi/30); % [Nm/A]
Mn=Km*In;

set(gcf, 'color', 'w');

M=0:0.1:Mn;
w1=(Un-M/Km)/Ke;
w2=(Un-20-M/Km)/Ke;
w3=(Un-40-M/Km)/Ke;

plot(M, w1, M, w2, M, w3, 'r', 'LineWidth', 2), grid on
ylabel('\omega [rad/s]'), xlabel('M [Nm]')
legend('Ua=200 V', 'Ua=180 V', 'Ua=160 V')

```

3. Inicijalizacijska skripta za estimaciju

```

clear
% Parametri motora (natpisna plocica)
Un = 200; % [V]
In = 10; % [A]
nn = 2000; % [rpm]
Pn = 1800; % [W]
% Izvedeni parametri motora
Ka = 0.25; % [A/V]
Ta = 25.0e-3; % [s]
Ra = 1/Ka; % [Ohm]
La = Ra*Ta; % [H]
Ke = (Un - In*Ra)/(nn*pi/30); % [Vs/rad]
Km = Pn/In/(nn*pi/30); % [Nm/A]

% Parametri pretvaraca
Kch = 40.0; % [V/V]
Tch = 0.0625e-3;
% Inercija motora
J = 0.01; % [kgm^2]
% Moment tereta (konst.)
Mt0 = 0.0; % [Nm]

% Neidealna mjerenja pozicije i struje
Nimp = 1000; % broj impulsa po okretaju
Nimp_quad = 4*Nimp; % nakon ucetverostrucenja
quant_step = 2*pi/Nimp_quad; % kvantizacija mj. pozicije [rad]
ia_noise_std = 0.01; % RMS suma mjerenja struje [A]

% Vrijeme uzorkovanja za rekonstrukciju brzine vrtnje
T = 1.0e-3;

% Model armature i mjerenja pozicije u prostoru stanja je treceg reda
% Mjerenja: kut zakreta (alpha) i struja armature (ia)
A = [0 1 0; 0 0 0; 0 -Ke/La -1/Ta];
B = [0; 0; 1/La];
C = [1 0 0; 0 0 1];

[F,G,H,D_] = c2dm(A,B,C,[0;0],T,'zoh');

Q = 1e4*diag([1 1e3 1]);
R = diag([(quant_step/T)^2 ia_noise_std^2]);
P = 100*diag([1 1 1]);

for(cnt = 1:1000)
    S = F*P*F' + Q;
    K = S*H'/(H*S*H' + R);
    P = S - K*H*S;
end

% DC_motor
% sim('DC_motor')
set(gcf, 'Color', 'w')

sim('DC_motor_discr_kf')

figure(1),
subplot(211),plot(t,u,'k--','LineWidth',2),grid on,hold
on,plot(t,ua/Kch,'r','LineWidth',2)
ylabel('u, u_a/K_c_h [V]'),legend('ulazni napon pretvaraca','napon armature')

```

```

subplot(212),plot(t,ia,'r','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(212),plot(t,ia_e,'g--','LineWidth',2),grid on,hold on
ylabel('i_a [V]'),xlabel('t [s]'),legend('mjerenje','estimat')
figure(2),
subplot(211),plot(t,omega,'r','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(211),plot(t,omega_e,'g--','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(211),plot(t,omega_diff,'b-.','LineWidth',2),grid on,hold on
ylabel('\omega [rad/s]'),legend('mjerenje','estimat','rekonstrukcija')
subplot(212),plot(t,alpha,'r','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(212),plot(t,alpha_e,'g--','LineWidth',2),grid on,hold on
ylabel('\alpha [rad]'),xlabel('t [s]'),legend('mjerenje','estimat')

```

4. Prijenosna funkcija niskopropusnog filtra

```

% Vrijeme uzorkovanja [s]
Ts = 1.0e-3;
% Vremenska konstanta niskopropusnog filtra prvog reda [s]
Tfn = 1.0e-2;

% Prijenosna funkcija u s-domeni
%
%          omega(s)          s
% Gwf(s) = ----- = -----
%          phi(s)          Tfn*s+ 1
%
% Prijenosna funkcija u vremenski-diskretnom (z) podrucju
a = exp(-Ts/Tfn);

num_df = [1 -1]; % (z-1)
den_df = [1 -a]; % [z-a]

% Alternativni pristup, c2dm

[num_df2,den_df2] = c2dm([1 0],[Tfn 1],Ts,'zoh');

% Prijenosna funkcija u z-domeni
%
%          omega(z)          z - 1
% Gwf(z) = ----- = -----
%          phi(z)          z - a
%
set(gcf, 'Color', 'w')

t = 0:Ts:5*Tfn;

w1 = step(tf(num_df,den_df,Ts),t);
w2 = step(tf(num_df2,den_df2,Ts),t);

figure(1)
plot(t,w1,'r'),grid on, hold on
plot(t,w2,'b-.')
legend('','')

```

5. Inicijalizacijska skripta za regulaciju brzine vrtnje uz Kalmanov filtar

```

clear
% Parametri motora (natpisna plocica)
Un = 200; % [V]
In = 10; % [A]
nn = 2000; % [rpm]
Pn = 1800; % [W]
% Izvedeni parametri motora
Ka = 0.25; % [A/V]
Ta = 25.0e-3; % [s]
Ra = 1/Ka; % [Ohm]
La = Ra*Ta; % [H]
Ke = (Un - In*Ra)/(nn*pi/30); % [Vs/rad]
Km = Pn/In/(nn*pi/30); % [Nm/A]

% Parametri pretvaraca
Kch = 40.0; % [V/V]
Tch = 1e-3;
% Inercija motora
J = 0.01; % [kgm^2]
% Moment tereta (konst.)
Mt0 = 0.0; % [Nm]

% Neidealna mjerenja pozicije i struje
Nimp = 1000; % broj impulsa po okretaju
Nimp_quad = 4*Nimp; % nakon ucetverostrucenja
quant_step = 2*pi/Nimp_quad; % kvantizacija mj. pozicije [rad]
ia_noise_std = 0.01; % RMS suma mjerenja struje [A]

% Vrijeme uzorkovanja za rekonstrukciju brzine vrtnje
T = 1.0e-3;

% Model armature i mjerenja pozicije u prostoru stanja je treceg reda
% Mjerenja: kut zakreta (alpha) i struja armature (ia)
A = [0 1 0; 0 0 0; 0 -Ke/La -1/Ta];
B = [0; 0; 1/La];
C = [1 0 0; 0 0 1];

%F = [1 T 0; 0 1 0; 0 -Ke*T/La exp(-T/Ta)];
%G = [0; 0; T/La];
%H = [1 0 0; 0 0 1];

[F,G,H,D_] = c2dm(A,B,C,[0;0],T,'zoh');

Q = 1e4*diag([1 1e5 1000]);
R = diag([(quant_step/T)^2 ia_noise_std^2]);
R = [1 0; 0 1];
P = 100*diag([1 1 1]);

for(cnt = 1:1000)
    S = F*P*F' + Q;
    K = S*H'/(H*S*H' + R);
    P = S - K*H*S;
end

% estimator
%D2 = 0.5; D3 = 0.5; Tee = 5.0e-3; % dinamika estimatora prema optimumu dvostrukog
odnosa, Te = 5 ms
%nume = 1; dene = [D3*D2^2*Tee^3 D2*Tee^2 Tee 1]; % estimator je treceg reda kao i
proces

```



```

%Pest = roots(dene); % polovi (zeljena dinamika) estimatora
%Kest = place(A', C', Pest); % pojačanja estimatora
%Kest = Kest';

% DC_motor
% sim('DC_motor')

%Regulator struje
Tci=Ta;
Kci=Tci/(2*Tch*Kch*Ka);

% Filtar derivacije pozicije
Tfn = 5.0e-3;
a = exp(-T/Tfn);

% Regulator brzine
Tei=2*Tch;
Tpar=1*Tfn;
Tsw=Tei+Tpar+T;
Tew=4*Tsw;
Tcw=Tew;
Kcw=J/(0.5*Tew*Km);

% DC_motor_discr_kf
% sim('DC_motor_discr_kf')
sim('reg_filt')
figure(1),
subplot(211),plot(t,u,'k--','LineWidth',2),grid on,hold
on,plot(t,ua/Kch,'r','LineWidth',2)
ylabel('u, u_a/K_c_h [V]'),legend('ulazni napon pretvaraca','napon armature')
subplot(212),plot(t,ia,'r','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(212),plot(t,ia_e,'g--','LineWidth',2),grid on,hold on
ylabel('i_a [V]'),xlabel('t [s]'),legend('mjerjenje','estimat')
figure(2),
subplot(211),plot(t,omega,'r','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(211),plot(t,omega_e,'g--','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(211),plot(t,omega_diff,'b-.','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(211),plot(t,brzina_ref,'k','LineWidth',2),grid on,hold on
ylabel('\omega [rad/s]'),legend('mjerjenje','estimat','rekonstrukcija')
subplot(212),plot(t,alpha,'r','LineWidth',2),grid on,hold on
subplot(212),plot(t,alpha_e,'g--','LineWidth',2),grid on,hold on
ylabel('\alpha [rad]'),xlabel('t [s]'),legend('mjerjenje','estimat')

```